

# Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

**Band 20**

Frank Hermsdorf

## Multiskalenansatz zur virtuellen Abbildung mehr- phasiger Fluidströmungen auf Gesamtfahrzeugebene



Schriftenreihe des Lehrstuhls

Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 20

ISSN 2509-694X





Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik

# DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Thema:

## **Multiskalenansatz zur virtuellen Abbildung mehrphasiger Fluidströmungen auf Gesamtfahrzeugebene**

*Bearbeiter*

Dipl.-Ing. Frank Hermsdorf

*Geboren am*

30.06.1982 in Dresden

*Betreuender Hochschullehrer*

Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik  
Technische Universität Dresden

*Co-Betreuender Hochschullehrer*

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Peters

Faculté des Sciences, de la Technologie et de la  
Communication  
Université du Luxembourg



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2022

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2021

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2022

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2022

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7569-9

eISBN 978-3-7369-6569-0



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der TU Dresden im Zeitraum von Januar 2012 bis zum Mai 2017.

Allein wäre diese Arbeit nicht oder nicht in dem Umfang und der Güte umsetzbar gewesen – doch zahlreiche Personen unterstützen mich bei der Durchführung des Projektes.

Allen voran möchte ich mich bei Herrn Professor Günther Prokop für die Möglichkeit der Bearbeitung, die Bereitstellung der Arbeitsumgebung und vor allem für die wissenschaftliche Betreuung des Themas bedanken. Die numerische Berechnung war bereits zu Studienzeiten ein sehr spannendes Feld für mich – die Umsetzung eines methodischen Ansatzes für die Berechnung mehrphasiger und variabel skaliertes Modelle faszinierte mich in der Zeit am Lehrstuhl.

Prof. Dr. Bernhard Peters gebührt ebenfalls mein Dank für die Zweitbegutachtung der Arbeit, aber auch für die Möglichkeit des fachlichen Austausches untereinander. Auch während der gemeinsamen Bearbeitung eines Teilprojektes war der rege und fruchtbare Wissensaustausch sehr wertvoll für mich.

Bedanken möchte ich mich auch herzlich bei Frau Dr. Denise Beitelschmidt sowie Herrn Professor Christoph Erhard welche mir nicht nur mit Rat und Tat zur Seite standen, sondern auch die Arbeit fachlich redigiert haben.

Des Weiteren gebührt mein Dank den Projektpartnern Dr.-Ing. Andreas Mittelbach und Matthias Wünsche (Mercedes-Benz AG) sowie Herrn Thomas Antesberger (BMW) für die gemeinsame Durchführung des Forschungsprojektes, in dessen Rahmen die vorliegenden Inhalte erarbeitet wurden.

Ohne meine Kollegen, welche mir stets ein anregendes, humorvolles, angenehmes und nicht zuletzt wundervolles Arbeitsumfeld bereitstellten, gilt mein Dank – insbesondere den Herren Per Lewerenz, Christoph Jahn, Thomas Tüschchen, Markus Köbe, Marcus Mai, Jan Kubenz und André Stoller, sowie den Damen Astrid Kretschmann und Gerlind Klemmt.

Nicht vergessen möchte ich die zahlreichen Studenten, die essenziell an der Entstehung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Herausstellen möchte ich hier die Herren Martin Naumann, David Merdivan, Stefan Sauerzapf und Daniel Wickert.

Abschließender und ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für ihre besondere Unterstützung in jeder noch so stressigen Zeit.

Dresden, September 2020

Frank Hermsdorf



## Kurzfassung

Für die effektive numerische Berechnung von Strömungsphänomenen im frühen Entwicklungsprozess wurde methodisch das Zusammenwirken verschiedener Berechnungstools hinsichtlich der Berechnungsdauer und Güte auf handelsüblichen Desktoprechnern untersucht. Dabei ist die Skalierbarkeit der Berechnungsmodelle auf unterschiedliche geometrische Skalen sowie die Umsetzungsmöglichkeit der Berechnung kombinierter Fluidphasen essenziell.

Für die Umsetzung wurden erste Grundlagenuntersuchungen an einfachen Geometrien experimentell und virtuell durchgeführt sowie die Ergebnisse gegenübergestellt. Daraus konnten Anforderungen abgeleitet und bereits im Ausschlussverfahren für das Projekt ungeeignete Software detektiert werden.

Weiterhin wurden die Simulationsparameter, aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen, an die komplexen Geometrien von Bauteilen/Baugruppen bis hin zum Viertelfahrzeug angepasst. Somit konnten für die jeweiligen Berechnungstools die Stärken hinsichtlich der Anforderungen an die Geometrie und die physikalischen Randbedingungen abgeleitet werden.

Anschließend wurde eine Software entwickelt, welche automatisiert Ergebnisse unterschiedlicher Softwarelösungen und geometrischer Skalen verarbeitet, interpoliert und anschließend auf gewählten Schnittstellen bereitstellt. Somit lassen sich die effektivsten Berechnungsmethoden miteinander verknüpfen.

Zudem konnte im Laufe der Bearbeitungszeit eine Software (PreonLab) zum Einsatz kommen, welche hinreichend genau und dennoch zeitlich effektiv komplexe Strömungsphänomene berechnen kann.

Im Zuge der Projektbearbeitung konnten somit Anforderungen als auch Randbedingungen für die numerische Berechnung komplexer Strömungsphänomene am Gesamtfahrzeug beschrieben werden.



## Abstract

In order to numerically calculate flow phenomena during the development process effectively, various calculation tools were tested on off-the-shelf desktop computers. The synergies of those tools were methodically evaluated with regards to length of calculation and result quality.

The scalability of calculation models to use a variety of geometric scales while also facilitating a calculation of combined flow phases was essential.

First basic analysis was conducted virtually as well as experimentally on simple geometries and the results were then compared.

The hereby deduced specific requirements were used to detect and eliminate inadequate software.

Based on fundamental analysis done beforehand, simulation parameters were then adjusted to more complex geometries of components or modules up to a quarter-vehicle.

This approach identified strengths of respective computation tools regarding geometry-related requirements and physical conditions.

Afterwards automatically process and interpolated the obtained values of different software solutions and geometric scales. The data was then accessible from pre-selected interfaces.

This allowed a combination of the most effective calculation methods.

During the processing time, a software simultaneously computed complex flow phenomena sufficiently in a timely manner.

While working on the project, requirements as well as boundary conditions that determine numeric calculation of complex flow phenomena on the overall vehicle were defined.



# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	III
Kurzfassung.....	V
Abstract.....	VI
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Formelzeichen, Indizes, Konstanten, Abkürzungen.....	IX
1.1    Formelzeichen.....	IX
1.2    Konstanten.....	XI
1.3    Indizes.....	XI
1.4    Abkürzungen.....	XII
Nomenklatur.....	XIV
2    Einleitung und Motivation.....	1
3    Grundlagen und Stand der Technik.....	4
3.1    Einführung Strömungslehre.....	4
3.1.1    Elementare Begrifflichkeiten.....	4
3.1.2    Phasen- und Komponentenströmungen.....	4
3.1.3    Newtonsche und Nicht-Newtonsche Fluide.....	5
3.1.4    Kinematische Beschreibung der Fluide.....	6
3.1.5    Essenzielle Grundgleichungen.....	8
3.1.6    Laminare und turbulente Strömung.....	13
3.1.7    Grenzschichttheorie und Ablösung.....	14
3.1.8    Spezifische Fluideigenschaften.....	16
3.1.9    Thermodynamik.....	22
3.2    Grundlagen numerische Strömungsmechanik.....	25
3.2.1    Historie der numerischen Strömungsmechanik.....	25
3.2.2    Berechnungsprozess in der Strömungsmechanik.....	26
3.3    Berechnungsansätze.....	33
3.3.1    Grundlagen Finite-Volumen-Methode (FVM).....	33
3.3.2    Grundlagen Lattice-Boltzmann-Methode (LB).....	34
3.3.3    Grundlagen Smoothed-Particle-Hydrodynamics (SPH).....	36
3.3.4    Modellansätze Mehrphasenströmung.....	39
4    Der Multiskalenansatz.....	44
4.1    Stand der Technik Submodelltechnik.....	44
4.2    Skalenbeschreibung.....	45
4.3    Randbedingungen der Berechnungsmethode auf den jeweiligen Skalen.....	46
4.4    Methodisches Vorgehen mittels des Multiskalenansatzes.....	48
4.5    Konstruktive Anforderungen an den Multiskalenansatz.....	48
4.5.1    Skalenunabhängige Optimierung der CAD-Geometrie.....	49
4.5.2    Parametergesteuerte Generierung des skalierten Simulationsraumes.....	51
4.6    Computational Fluid Dynamics (CFD).....	52
4.6.1    ANSYS Fluent.....	53



4.6.2	OpenFoam .....	53
4.6.3	OpenLB .....	54
4.6.4	DualSPPhysics .....	55
4.6.5	PreonLab .....	56
4.7	Softwareübergreifende Zusammenführung der Anforderungen und Ergebnisse .....	57
4.8	Interpolation der im-/exportierten partitionierten Daten .....	59
5	Vorbetrachtungen .....	63
5.1	Mikroskopische Betrachtung .....	63
5.2	Mesoskopische Betrachtung .....	69
5.2.1	Definition der Viskositätsparameter .....	69
5.2.2	Parameterbestimmung Adhäsion / Kohäsion .....	72
6	Fahrzeugbaugruppenuntersuchungen .....	74
6.1	Allgemeine Start- und Randbedingungen .....	74
6.2	Durchströmung Wasserkasten Beifahrerseite PKW .....	76
6.2.1	Versuchsaufbau- und Durchführung sowie Auswertung .....	77
6.2.2	Numerische Berechnung der Strömungseigenschaften im Wasserkasten .....	83
6.2.3	Ergebnisinterpretation der Fluid- und Luftströmungen .....	100
6.2.4	Möglichkeiten und Grenzen der Durchströmungsberechnung Wasserkasten F30 .....	109
6.3	Durchströmung Fahrtüren .....	111
6.3.1	Versuchsaufbau, Durchführung sowie Auswertung .....	113
6.3.2	Numerische Berechnung der Türberechnung sowie des Wasserdurchflusses .....	120
6.3.3	Ergebnisinterpretation der Strömungseigenschaften an einer Türbaugruppe – Fazit .....	138
7	Effizienzbewertung .....	140
7.1	Pre-Prozess .....	141
7.2	Lösungsprozess .....	142
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	147
8.1	Zusammenfassung .....	147
8.2	Ausblick .....	150
9	Literaturverzeichnis .....	152
10	Abbildungsverzeichnis .....	157
11	Anhang .....	160
11.1	Mesoskopische Versuche .....	160
11.2	Versuchsträger .....	160
11.3	Regenkammer .....	161
11.4	Auswertung Luftströmung Ansys Fluent .....	161
11.5	Auswertung Wasserströmung OpenLB .....	162
11.6	Übersichtstabelle .....	163



## Formelzeichen, Indizes, Konstanten, Abkürzungen

### 1.1 Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Erklärung</u>
$A$	m <sup>2</sup>	Fläche
$b$	-	Ausbreitungsrichtung
$c_p$	kJ/(kg·K)	spezifische Wärmestromdichte
$CA$	°	Kontaktwinkel
$d$	m	Durchmesser
$E$	J	Energie
$E$	J	Energie
$f$	N	Äußeres Kraftfeld
$f_i^{eq}$	%	Gleichgewichtslösung nach Maxwell für Partikelkollisionen
$f_i$	%	Kollisionswahrscheinlichkeit für Partikel
$F$	N	Kraft
$\underline{F}$	-	Zu-/Abfluss
$i$	-	Laufvariable
$\vec{k}$	m/s	Volumenverteilte Beschleunigung
$k$	m/s <sup>2</sup>	äußere volumenverteilte Beschleunigung
$k$	-	Dimension des Raumes
$latticeL$	m	Netzkantenlänge
$L$	m	Plattenlänge
$m$	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom
$\underline{n}$	-	Normalvektor Zu-/Abfluss
$N$	-	Anzahl der Partikel im Rechengebiet



$N$	$m^{-1}$	Netzauflösung
$Oh$	-	Ohnesorge-Zahl
$p$	bar	Druck
$P$	W	Leistung
$q$	$W/m^2$	emittierte Strahlungsenergiestromdichte
$q_i$	$W/m^2$	Wärmestromdichte
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$Ra$	nm	Rauheit
$Re$	-	Reynoldszahl
$S$	-	Bezeichnung Rechengebiet
$t$	s	Zeit
$T$	K	Temperatur
$T$	s	Zeitintervall
$u$	m/s	Geschwindigkeit
$U$	-	Funktionsgröße
$V$	$m^3$	Volumen
$W$	-	Gewichtungsfunktion
$\dot{W}$	W	Leistung
$We$	-	Weberzahl
$x$	m	Weg
$z$	m	Höhe
$\alpha$	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha$	°	Winkel
$\alpha$	%	Volumenanteil
$\alpha_q$	-	Volumenanteile in Partikelphase
$\gamma$	$s^{-1}$	Deformationsgeschwindigkeit



$\delta_{99}$	-	Grenzschichtdicke
$\delta_{SPH}$	-	DualSPPhysics Korrekturfaktor
$\Delta$	-	Differenz
$\varepsilon$	-	Emissionsgrad
$\zeta$	-	Druckverlustbeiwert
$\eta$	-	Wirkungsgrad
$\eta$	Pa s	Viskosität
$\lambda$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$\nu$	M <sup>2</sup> /s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	N/m	Oberflächenspannung
$\tau$	Pa	Schubspannung
$\Omega$	-	Kollisionsoperator
$\Omega_i$	s <sup>-1</sup>	Kollisionsoperator

## 1.2 Konstanten

<u>Zeichen</u>	<u>Wert</u>	<u>Erklärung</u>
$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante

## 1.3 Indizes

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>
0	Startzeitpunkt
abs	absolut
aus	Austretend
ein	Eintretend



ges	gesamt
krit	kritisch
proj	projiziert
q	Phase
RQ	Regenquelle
tot	total
$\infty$	Unendlich

## 1.4 Abkürzungen

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
BMW	Bayrische Motorenwerke
CA	Contact Angle
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl
CPU	central processing unit
DL.i	Dichtlippeneintritte
DR.i	Dichtrahmeneintritte
E.i	Einlassöffnungen
FEM	Finite-Elementen-Methode
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FVM	Finite-Volumen-Methode
GB	Gigabyte
GPU	graphics processing unit
GUI	Graphical User Interface



H <sub>2</sub> O	Wasser
HE.i	Haupteintritte
HPC	High-Performance-Computing
LBM	Lattice-Boltzmann-Methode
LS	Level-Set
MAC	Marker and Cell
MLUP	million lattice site updates
PKW	Personenkraftwagen
Pos	Position
RAM	Random-Access Memory
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes equations
SPH	Smoothed-Particle-Hydrodynamics
Vel	Velocity
VoF	Volume-of-Fluid
VS	Versuch
WE.i	Wassereintrittsstellen
XML	Extensible Markup Language



## Nomenklatur

Es gelten in dieser Arbeit folgende Konventionen:

- Sofern nicht anders angegeben, wird das Fahrzeugkoordinatensystem nach ISO 8855 verwendet  
(x-Achse – Fahrtrichtung vorn, y-Achse – Fahrtrichtung linke Seite, z-Achse - nach oben).
- Sofern nicht anders angegeben, sind Vektoren im inertialen Koordinatensystem beschrieben.
- Sofern nicht anders angegeben, gelten die SI-Einheiten.

## 2 Einleitung und Motivation

Der moderne Fahrzeugentwicklungsprozess erfordert schnelle und kostengünstige Erkenntnisse über physikalische sowie chemische Wirkketten, um ein ständiges Weiterentwicklungspotential und einen frühen Erkenntnisgewinn ausschöpfen zu können.

Die Optimierung des kompletten Entwicklungsprozesses erfordert, dass Design-, Werkstoff- sowie Package-relevante Bauteildefinitionen möglichst zeitig nach den zu erwartenden Belastungen ausgelegt werden. Hierbei stellt insbesondere die Korrosionsvermeidung sowie -vorbeugung im Gesamtfahrzeugabsicherungsprozess ein kundenrelevantes Szenario dar.

Jedoch lassen sich Aussagen über die Korrosionsneigung neuer Fahrzeugentwicklungen aufgrund komplexer Zusammenhänge zwischen Fluidfließwegen, mechanischen Belastungen, Abtrocknungsvorgängen und chemischen Zusammensetzungen der Belastungsmedien auf experimenteller Ebene erst spät im Entwicklungsprozess treffen. Etwaige Bauteiländerung im Sinne der Korrosionsabsicherung im Prototypenstadium ziehen kostenintensive Aufwände nach sich oder sind nicht mehr umsetzbar.

Neben Versuchen auf Prüfständen oder Versuchsstrecken etabliert sich die numerische Belastungssimulation in allen Phasen des Entwicklungsprozesses. Ein wichtiger Vertreter der virtuellen Werkzeuge ist die Computersimulation zur Nachbildung korrosionsklimatischer Belastungssimulationen und Optimierung technischer Systeme.

Die Basis einer solchen Simulation stellen die physikalischen Grundgleichungen der jeweiligen Problemstellung dar. Aufgrund der Komplexität der Wirkzusammenhänge des Korrosionsvorganges ist es erforderlich, dass sich die numerische Methode zur Vorhersage dieser Vorgänge aus verschiedenen Simulationsszenarien zusammensetzt. Zum einen interagieren unter anderem mechanische Einflussgrößen (Bauteilschwingungen, Beschädigungen etwaiger Schutzschichten), chemische Reaktionen sowie die physikalische Beschreibung der Strömungswege in den zu untersuchenden Bauteilen miteinander.

Weiterhin stellt die oft hochkomplexe Geometrie von Fahrzeug- und Bauteilstrukturen bestehende Berechnungsalgorithmen vor große Herausforderungen, insbesondere im Rahmen der notwendigen Diskretisierung des Berechnungsraumes zum Lösen der numerischen Gleichungen.

Diese Diskretisierung erlaubt die Beschreibung n-dimensionaler Räume in infinitesimale Kontrollflächen oder -volumina und bildet dementsprechend die Grundlage für eine erfolgreiche numerische Bauteilberechnung. Hierbei stellen die geometrischen Skalen sowie Detailierungsgrade eine Beschränkung in der effizienten Durchführung der Diskretisierung und letztendlich der

Ergebnisgüte dar. Ein dabei entstehender Zielkonflikt zwischen Ergebnisgüte und Rechendauer muss dementsprechend anwendungsorientiert aufgelöst werden.

Eine effiziente Detailbetrachtung eines Strömungsraumes, ausgehend von den gesamtheitlichen Strömungseigenschaften, soll mittels einer Multiskalenmethode ermöglicht werden, um somit den Zielkonflikt zwischen Ergebnisgüte und Bearbeitungszeit zu minimieren, wie schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt.

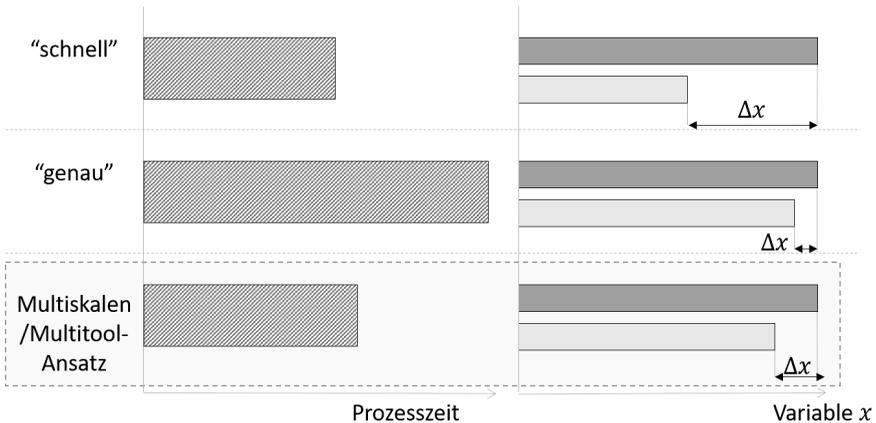


Abbildung 2-1: Zielkonflikt zwischen Ergebnisgüte und Berechnungsdauer

Ein Kerngedanke des Multiskalenansatzes ist die Kombination unterschiedlicher Simulationsmethoden für variierende geometrische Skalen. Den Simulationsmodellen sollen die Eingangsgrößen sowie weitere Randbedingungen automatisiert übergeben werden, welche zuvor aus einer über- oder untergeordneten Skala als Referenzgröße herausgelesen wurden.

Während in den aktuellen Entwicklungszyklen umfangreiche Berechnungsmodelle auf Hochleistungsrechenzentrum ausgelagert werden, soll dieser Ansatz eine schnelle Berechnung des Strömungsverhaltens in komplexen Betrachtungsräumen auf handelsüblichen Desktop-Rechnern ermöglichen. Somit können bereits im frühen Stadium des Entwicklungsprozesses effiziente und richtungweisende Aussagen getroffen werden. Diese Anforderung gilt als zentraler Untersuchungsschwerpunkt.